

利用 TOPEX 卫星高度计资料分析台湾岛周边海域巨浪和大风特征

谢辛¹, 李燕初¹, 许德伟¹, 郑凌虹¹, 林明森^{1,2*}

(1. 国家海洋局 第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2 国家海洋局 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘要: 卫星高度计实现了对全球性或区域性的海洋参量的实时监测, TOPEX 卫星高度计提供了迄今为止时间序列最长、数据质量最高的全球海面风速和有效波高的同步观测资料。利用 TOPEX 卫星高度计资料, 分析了有效波高 4 m 以上的巨浪在台湾岛周边海域的时空分布特征, 结果表明台湾岛周边海域巨浪的分布具有明显的季节特征。每年平均有效波高最大值大多数出现在夏季, 春季是 1 a 中有效波高最小的季节, 而秋季和冬季是巨浪出现频率最高的季节。波高大于 6 m 的巨浪大都出现在台湾岛东部及东北部海域, 在南部海域出现较少。

关键词: 台湾岛周边海域; 有效波高; 巨浪; 时空分布特征

中图分类号: P736.41

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2009)05-0001-09

1 引言

台湾岛周边海区的特点各不相同。台湾岛周边海区的水文环境主要受季风、沿岸流、台湾暖流的影响和控制^[1]。台湾岛周边海区位于亚热带季风区, 风的季节变化十分明显; 台湾岛周边海区终年海浪较大, 海浪随季节呈明显的变化趋势^[2]。

应用卫星遥感技术可得到海洋卫星遥感观测海洋的大量数据。星载微波高度计测量到的海面高度、有效波高(SWH)及海面风速, 对大地测量、海洋环流、极地海冰、海洋潮汐等及其相关研究以及海洋在全球气候变化中作用的研究具有重要的意义。利用卫星高度计获得的有效波高在数值预报、极值统计预报、海洋工程等方面都有广泛的应用。

波浪使海面起伏不平, 高度计发出的脉冲式球面波波前首先被波峰反射, 稍后才被波谷反射, 使回波信号的上升沿出现展宽, 这个过程可以在回波信号的前沿斜波区上表现出来, 这样可以从回波分析中研究有效波高。

在利用遥感资料进行风浪特征分析方面国内开

展了许多工作, 齐义泉等^[3]利用 GEOSAT 卫星高度计资料, 研究分析了南海北部海域的有效波高特征, 结果表明, GEOSAT 高度计研究区域波浪特征与常规手段所得结论基本一致, 但是对于大风浪海况的研究, 卫星高度计资料具有明显的优势。

纪永刚等^[4]利用 T/P 卫星高度计资料测量的有效波高, 建立和反演有效波高的模型, 得出合理的有效波高反演模式。李燕初等^[5]利用 T/P 卫星高度计遥感资料对南海及台湾岛附近海域的季节环流、潮汐、中尺度涡等各种海洋特征进行了研究。

在利用 T/P 资料研究风浪特征方面, 林琿等^[6]利用 TOPEX 卫星高度计观测全球海面风速和有效波高以及季节变化, 利用 T/P 卫星高度计 1 a 的资料对全球风速和有效波高的季节变化规律进行了研究, 对世界大洋的主要风区和浪区进行了准确定位, 对其季节变化的强度和特征进行了定量分析; 初步解释了全球海面风速季节变化的多样性和有效波高在对海面风速影响过程中的变异性。在相关海域中, 孙群等^[5]利用 TOPEX 卫星高度计和日本气象厅浮标资料, 对东海的有效波高和风速进行了比

收稿日期: 2009-04-04; 修订日期: 2009-09-04。

基金项目: 国家“八六三”课题资助(2006AA09Z138); 国防科工委预先研究项目——“HY-2”卫星应用预先研究。

作者简介: 谢辛(1978—), 男, 福建省闽清县人, 硕士研究生, 从事海洋微波遥感反演算法研究。E-mail: xiexin98@163.com

较,分析了卫星高度计资料的有效性。利用有效波高和风速的 3 种概率密度函数分布,结合 TOPEX 卫星高度计资料,并采用最大似然法对统计分布参数进行估计,结果表明,有效波高的对数-正态概率密度函数分布与观察资料的直方图在有效波高的整个范围内符合较好,风速的直方图与 Weibull 概率密度分布符合较好。陈红霞等^[8]利用 1992 年 12 月至 2005 年 3 月 TOPEX 卫星高度计资料,对我国近海波浪季节特征及其时间变化进行了分析,分析结果表明,冬季平均波高最大,台湾海峡、南海北部是冬季的大浪区;夏季平均波高最小;春秋两季为过渡期。

目前利用卫星遥感资料分析台湾岛周边乃至台湾海峡的风浪特征的研究还比较少见,本文利用近 10 a 的 T/P 卫星资料研究了台湾岛周边海域的风浪特征及年际变化,给出该海区的风浪特征,通过多年的数据分析,研究台湾岛周边海区风浪特征的季节和年际变化。

本文首先利用 Rayleigh, Weibull 及 Log-Normal 概率密度函数分布,绘制各种密度分布函数的变化曲线图,结合其他常规资料,对台湾岛周边海域的大风和巨浪场进行统计分析,研究其分布特征及季节变化。

2 研究区域和数据

本文研究的范围是台湾岛周边海域,范围在 $20^{\circ} \sim 28^{\circ} \text{N}$, $117^{\circ} \sim 124^{\circ} \text{E}$,在该海域有 6 条卫星地面轨道经过,轨道上的每一个星下点(图 1)均有海面高度测量,星下点沿轨方向空间分辨率为 6 km。文中定义春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12 月至翌年 2 月。本文将台湾岛周边海区分分为东西南北四个海区,具体划分如图 1 所示。

T/P 卫星资料来源于 AVISO 归档中心分发的 GDR-S 含原始波形的数据集,采用的 T/P 高度计资料的时间是 1993 年至 2002 年夏季约 10 a 的数据资料。

3 台湾岛周边海域巨浪和大风的时空分布特征

海浪是海面上一种十分复杂的自然现象,一般波高大于 3 m 以上的海浪称为大浪,大浪通常对航行在海上的绝大多数船舶,尤其对近海的船

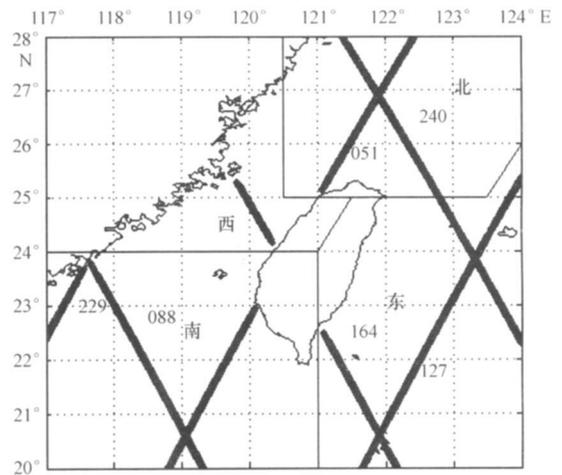


图 1 台湾岛周边海域和经过该海域的 T/P 轨道及区域划分(图中数字代表轨道号)

只构成威胁。巨浪(本文定义为有效波高大于或等于 4 m 的波浪)的分布特征是海洋工程、军事及航海等方面比较关注的问题,因其所构成的灾害性海况将对海上航行和海上建筑物构成严重威胁,而大于 6 m 以上波高的海浪为灾害浪,它是造成海上事故的最主要原因。本文采用台湾岛周边海域的 T/P 卫星高度计资料,分析了有效波高在该海域的时空分布特征。在有效样本点 127 053 个中有效波高大于或等于 4 m 的巨浪数据有 3 605 个,占总样本的 2.84%。

海洋中的波浪可分为风浪、涌浪、近岸浪等数种,其中最常见的是风浪。风浪是指由当地风产生且一直处在风的作用之下的海面波动状态。一般情况下海洋中的波浪都是由风力引起的。研究风的时空分布特征有助于认识波浪的时空分布特征。

3.1 台湾岛周边海域巨浪有效波高条件概率密度分布

根据有效波高的 3 种概率密度函数:瑞利概率密度函数分布、威布尔概率密度函数分布、对数-正态密度函数分布,可以得到有效波高大于或等于 4 m 的巨浪对应的 3 种条件概率密度函数:

$$f_1(H_s | H_s \geq 4) = \frac{H_s}{a} e^{-\frac{H_s^2 - 16}{2a^2}}, \quad (1)$$

$$f_2(H_s | H_s \geq 4) = c \chi H_s^{c-1} e^{-\chi(H_s^c - 4^c)}, \quad (2)$$

$$f_3(H_s | H_s \geq 4) = \frac{\left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}OH_s} e^{-\frac{(\ln H_s - \mu)^2}{2\sigma^2}} \right]}{\left[-\frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{\ln 4 - \mu}{\sigma} \right] - \frac{\sqrt{2\pi}}{2\sigma} \right]}, \quad (3)$$

式中, 参数 α , λ , c , μ , σ 的值由表 1 确定。

表 1 H_s 和 U_{10} 概率密度函数中的各参数估计值

变量	H_s	变量	U_{10}
α	1.315 6	b	6.034 0
λ	2.237 6	δ	8.509 5
c	1.826 2	d	2.182 1
μ	0.471 0	v	2.028 0
σ	0.533 1	β	0.537 0

从图 2 可以看出, 对于有效波高, 3 种分布的累积率曲线在整个有效波高范围内分布相似, 有效波高实测值的累积率与 Log Normal 分布的累积率曲线走势比较吻合; 相比而言, Rayleigh 累积率曲线更靠近实测资料的累积率曲线, 但是在曲线的起始和结束阶段它都比实测值大, 而在中段小于实测值; Weibull 累积率曲线与实测值的累积率曲线除了在起始阶段偏差不大外, 在有效波高大于 1.5 m 后曲线就偏离实测值很多了。

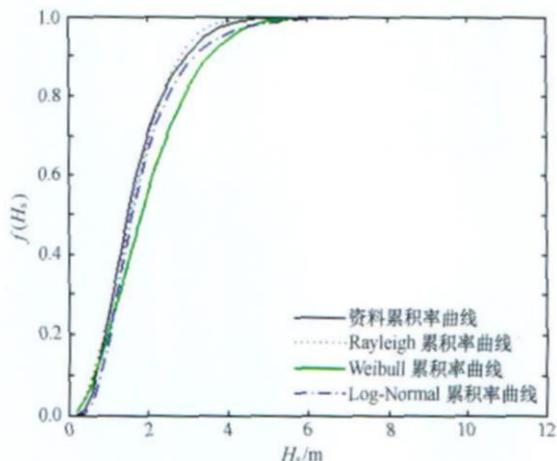


图 2 有效波高的理论累积率曲线与资料累积率曲线的比较

3.2 台湾岛周边海域巨浪的季节分布特征

图 3 给出了巨浪 (大于或等于 4 m) 的季节变化。图中巨浪分布的有效波高有明显的季节变化, 1 a 中最大值主要出现在夏季, 这是因为在每年的夏季台风高发, 出现了较大的台风浪, 所以夏季的平均有效波高最大。图中平均值为 3.5 m 的表征该季节没有出现巨浪。具体的数据统计见表 2。

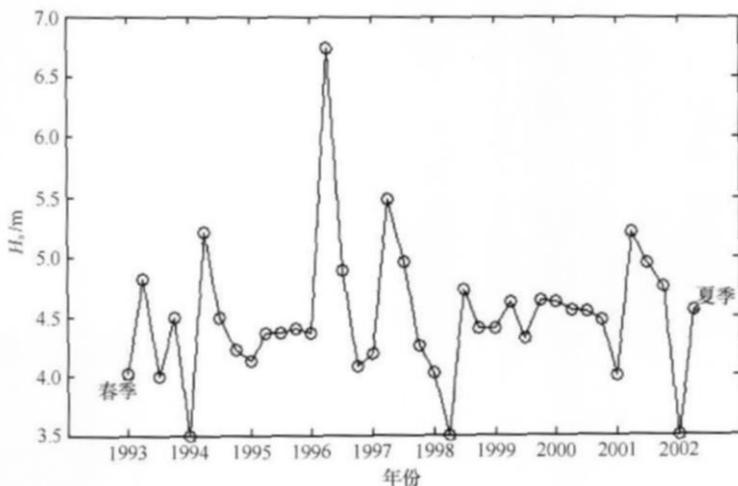


图 3 巨浪的平均有效波高季节变化

图 4 给出了在不同季节有效波高大于或等于 4 m 的巨浪出现的频率 (每年各季节 4 m 以上巨浪的个数与 4 m 以上巨浪总个数之比的百分数)。从图 4 可以看出冬季和秋季特别是秋季是巨浪出现频率较高的季节。

根据 1993—2002 年连续 10 a 的 T/P 卫星高度计观测的有效波高资料, 在图 5—8 给出了台湾岛周

边海域有效波高大于或等于 4 m 的巨浪在不同季节的空间分布。图 5—8 中青色的点表示有效波高大于或等于 4 m 但小于 6 m 的点, 红色的空心圆表示有效波高大于或等于 6 m 的点。在总共 3 563 个有效波高大于或等于 4 m 的点中, 有效波高大于或等于 4 m 但小于 6 m 的点有 3 388 个, 有效波高大于或等于 6 m 的点有 175 个。

表 2 巨浪($H_s \geq 4$ m)的季节变化(巨浪的季节平均有效波高及发生频率)

年份	季节	巨浪样本数	巨浪平均波高/m	巨浪发生频率
1993	春季	7	4.03	0.001 9
	夏季	71	4.83	0.019 7
	秋季	3	4.0	0.000 83
	冬季	189	4.5	0.052 4
1994	春季	0	0	0
	夏季	90	5.22	0.025 0
	秋季	185	4.5	0.051 3
	冬季	61	4.23	0.017 0
1995	春季	7	4.13	0.001 9
	夏季	67	4.37	0.018 9
	秋季	193	4.37	0.053 5
	冬季	232	4.40	0.064 4
1996	春季	26	4.37	0.007 2
	夏季	19	6.73	0.005 27
	秋季	275	4.9	0.076 3
	冬季	18	4.08	0.005 0
1997	春季	9	4.19	0.002 5
	夏季	147	5.48	0.040 8
	秋季	101	4.97	0.028 0
	冬季	79	4.26	0.021 9
1998	春季	10	4.03	0.002 8
	夏季	0	0	0
	秋季	138	4.73	0.038 3
	冬季	331	4.40	0.091 8
1999	春季	23	4.40	0.006 4
	夏季	52	4.62	0.014 4
	秋季	172	4.32	0.047 7
	冬季	153	4.64	0.042 4
2000	春季	52	4.62	0.014 4
	夏季	68	4.55	0.018 9
	秋季	129	4.54	0.035 8
	冬季	254	4.47	0.070 5
2001	春季	2	4.0	0.000 55
	夏季	199	5.21	0.055 2
	秋季	113	4.95	0.031 3
	冬季	85	4.75	0.023 6
2002	春季	0	0	0
	夏季	45	4.55	0.012 5

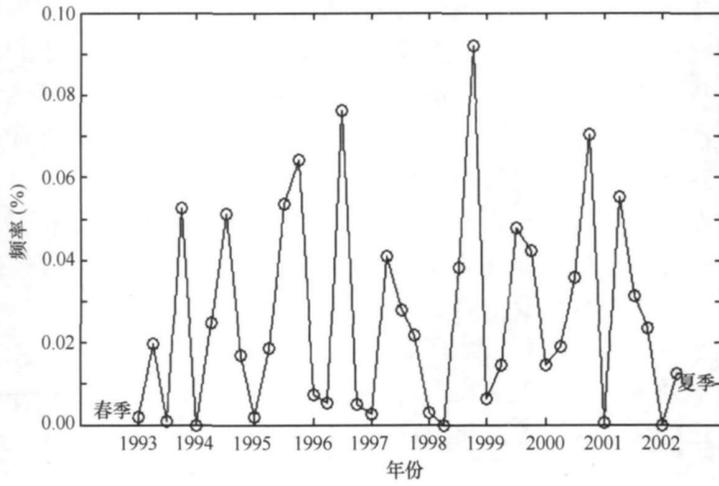


图4 巨浪出现的频率季节变化

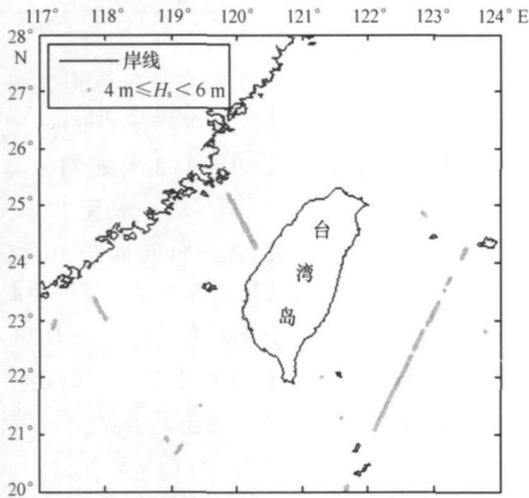


图5 巨浪有效波高的季节(春季)分布

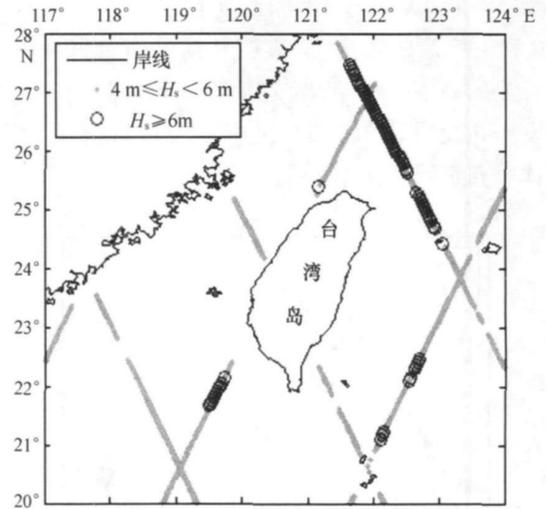


图7 巨浪有效波高的季节(秋季)分布

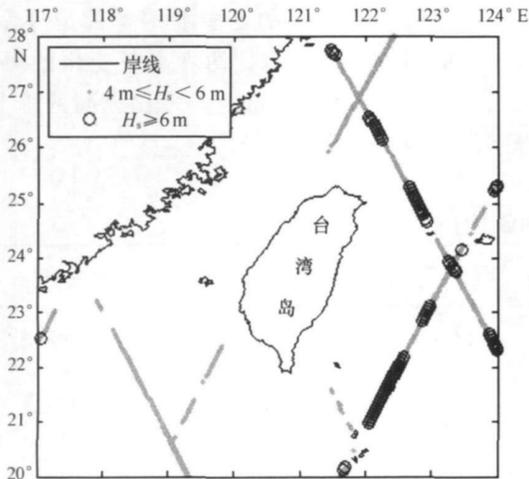


图6 巨浪有效波高的季节(夏季)分布

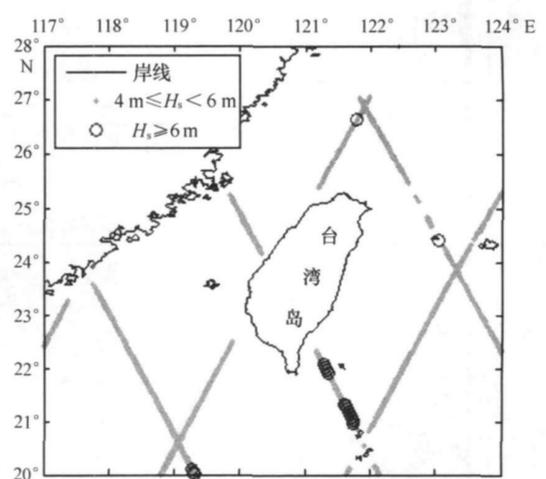


图8 巨浪有效波高的季节(冬季)分布

由于我国处于东亚季风区^[6], 整个台湾岛周边海域受东亚季风的控制, 波浪场也有显著的季节变化, 除春季外, 其他 3 个季节出现的巨浪范围都很大, 基本上在 T/P 沿轨的地方都观测到巨浪, 在冬夏季风转换的季节, 春季巨浪出现的频率和范围都显著减小, 特别在春季没有出现有效波高大于或等于 6 m 的点, 而在夏季和秋季有有效波高大于或等于 6 m 的点, 在台湾岛东部及东北部海域出现的频率非常高, 这两个季节刚好是台风影响该海域的高频率期。秋季在东北部海域出现的频率高于东部海域的, 这应该与这个季节北方冷空气加强有关。

在所有的 T/P 数据中有效波高大于或等于 7 m 的点总计有 73 个, 占样本总数的 0.057%, 其中夏季为 55 个, 秋季为 18 个。所有这些点都分布在 240 和 127 两条轨道上, 表明台湾岛东部和东北部是巨浪的高发区。有效波高大于或等于 8 m 的点都发生在夏季, 这应该与夏季多台风有很大关系。具体分布情况如图 9 所示。

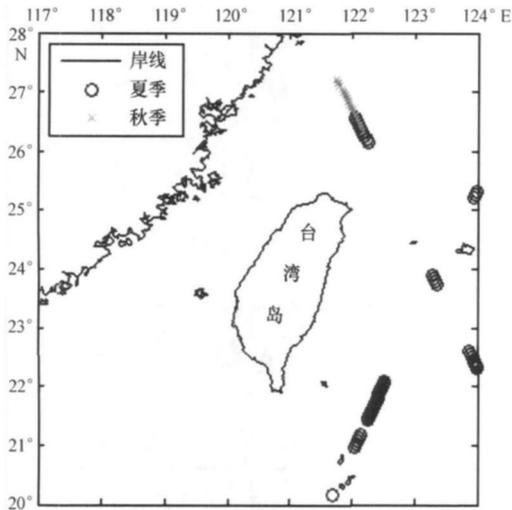


图 9 有效波高大于或等于 7 m 的季节分布

3.3 台湾岛周边海域巨浪的空间分布

表 3 给出了台湾岛周边海域东西南北四个海区 (具体划分见图 1) 的样本个数。从表 3 可以看出虽然在台湾海峡(西区)没有有效波高大于 6 m 的巨浪, 但是巨浪占样本总数的比例在各个海区中是最高的, 表明台湾海峡也是巨浪发生较多的地方。有效波高大于 6 m 的大多分布在北区和东区, 这与前面的统计是一致的。

表 3 巨浪的区域分布

	东区	西区	南区	北区	总计
区域样本数	47 501	5 437	43 545	30 570	127 053
$4 \text{ m} \leq H_s < 6.0 \text{ m}$	1 402	323	1 246	459	3 430
$H_s \geq 6.0 \text{ m}$	106	0	14	55	175
巨浪占样本比例	0.031 7	0.059 4	0.028 9	0.016 8	0.028 4

3.4 台湾岛周边海域大风的时空分布特征

本文在研究巨浪的时空分布特征的同时, 也采用台湾岛周边海域的 T/P 卫星高度计资料来分析风速(U_{10})大于或等于 13.9 m/s 的 7 级及 7 级以上的大风的时空分布特征, 具体的分布如图 10 和 11 所示, 数据见表 4。在有效样本点 127 053 个中风力在 7 级以上的数据有 5 410 个, 占总样本的 4.26%, 因季节划分的原因, 在统计分析季节变化时表格和图中的数据不包含 1993 年 1 月份的数据, 其有效样本为 5 163 个, 占总样本的 4.06%。

对比巨浪和大风季节变化的平均值分布图(见图 2, 10), 可以看出两者的分布非常相似, 巨浪和大风在 1 a 中的最大值大都出现在夏季, 其中平均值最大的都出现在 1998 年的夏季, 而春季都是两者最小值出现最多的季节。对比两者季节变化的频率(见图 3, 11), 秋季和冬季都是频率比较高的季节, 而春季仍是频率较低的季节。

表 4 大风(7 级)样本的区域分布

	东区	西区	南区	北区	全部海区
区域样本数	47 501	5 437	43 545	30 570	127 053
大风样本数	1 566	911	2 032	901	5 410
占总样本比例	0.033 0	0.019 2	0.046 7	0.029 5	0.042 6
平均风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	15.194 6	15.621 1	15.051 3	14.937 1	15.169 7

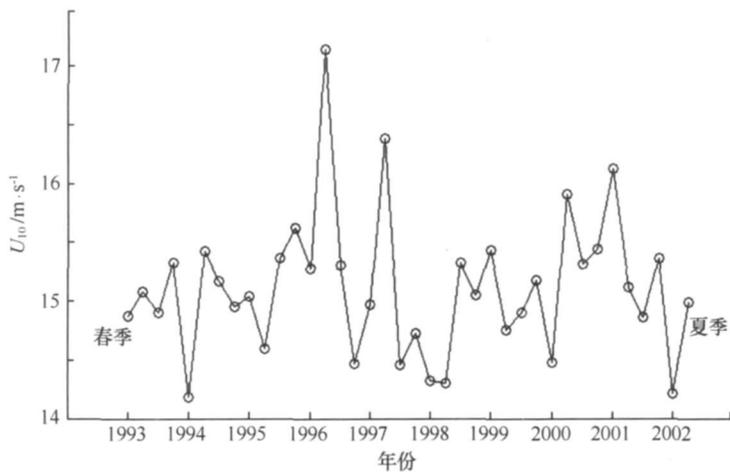
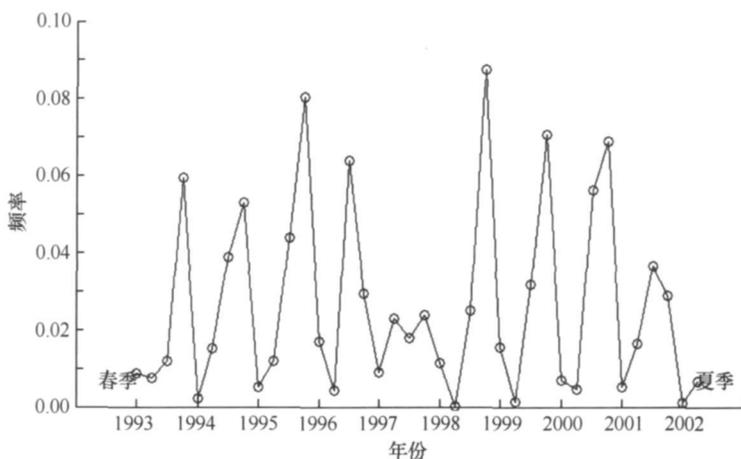
图 10 大风($U_{10} \geq 13.9$ m/s)的平均风速季节变化图 11 大风($U_{10} \geq 13.9$ m/s)频率季节变化

图 12 和 13 分别给出了 1993—2002 年近 10 a 的月平均有效波高和海面风速的分布, 从图可以看出海浪分布特征与风速分布特征具有非常大的相关性。由图 12 可以看出在该海区海面季风变化先于海浪变

化, 图 12 中 5 月份的风速在最小时达到拐点, 而在 6 月份的风速已经开始增强但海浪却继续变小(海浪的拐点推迟了 1 个月), 8 月份后风速和海浪的变化都急剧变大和增强。到冬季平均风速和海浪达到最大。

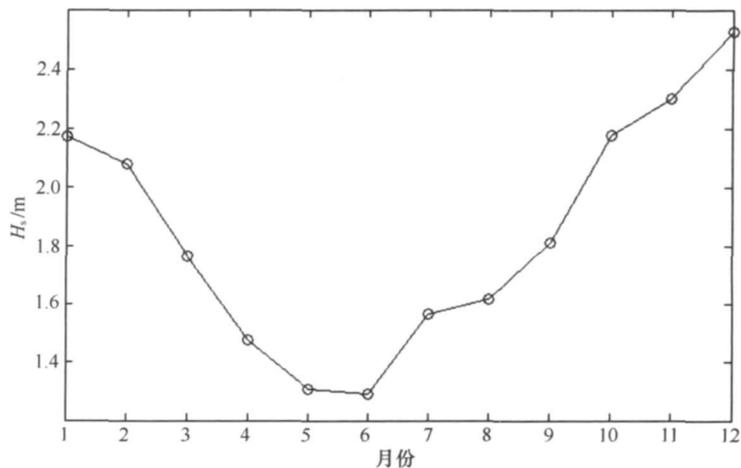


图 12 有效波高的月平均分布

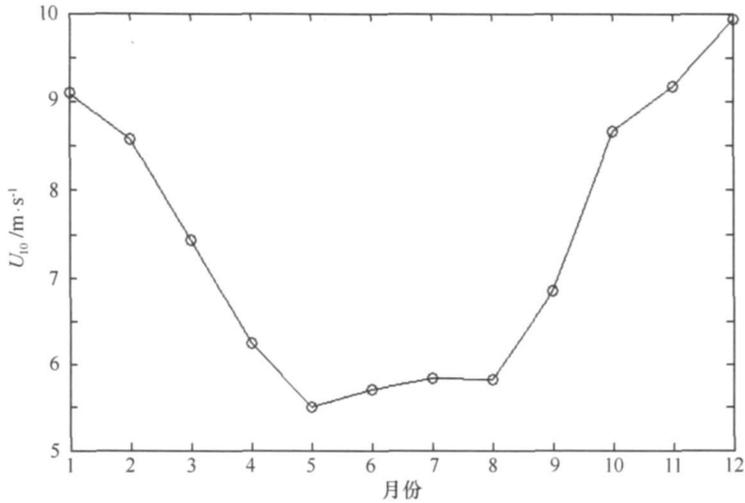


图 13 风速的月平均分布

4 结论

本文利用 TOPEX/POSEIDON 卫星提供的巨浪(有效波高大于或等于 4 m)的观测资料,对台湾岛周边海域的巨浪进行了统计分析,从统计数据来看,巨浪出现的频率不高,仅占全部样本的 2.84%。分析结果表明,台湾岛周边海域的巨浪分布具有明显的季节特征,1a 中有效波高的最大值主要出现

在台风出现频率较高的夏季,而秋季和冬季则是巨浪发生频率较高的季节,春季巨浪出现的频率和范围都比较小。有效波高大于或等于 6 m 的巨浪主要分布在轨道 127 和 240 所在的东部及北部海域,在季节分布上主要分布在夏季和秋季。在对比巨浪和大风(7 级)的统计分析中,发现两者的时空分布特征具有高度的一致性。卫星高度计可以实现对恶劣海况的实时监测。

参考文献:

- [1] 张国友,张绪东,俞慕耕,等. 台湾海区的风浪特点及分布规律[J]. 海洋通报, 2002, 21(1): 23-30.
- [2] 张学宏,俞慕耕,江伟,等. 台湾周边海区的海浪特点[J]. 海洋预报, 2000, 17(1): 75-83.
- [3] 齐义泉,施平,毛庆文. GEOSAT 卫星高度计遥感分析南海北部的海浪特征[J]. 海洋学报, 1998, 20(02): 20-26.
- [4] 纪永刚,张杰,杨永增. TOPEX 卫星高度计资料有效波高数据分析及极值统计预报[J]. 黄渤海海洋, 2002, 20(1): 25-33.
- [5] 李燕初,李立,林明森,等. 用 TOPEX/POSEIDON 高度计识别台湾西南海域中尺度强涡[J]. 海洋学报, 2002, 24(增刊 1): 163-170.
- [6] 林琿,陈戈. 利用 TOPEX 卫星高度计观测全球海面风速和有效波高的季节变化[J]. 科学通报, 2000, 45(4): 411-418.
- [7] 孙群,宋金宝,陈小刚. 利用 TOPEX 卫星高度计资料分析东中国海的风、浪场特征[J]. 海洋科学, 2006, 30(4): 10-15.
- [8] 陈红霞,华锋,袁业立. 中国近海及临近海域海浪的季节特征及其时间变化[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 407-415.

The analysis of the characteristics of wind and wave fields over the surrounding waters of Taiwan Island using TOPEX satellite altimeter data

XIE Xin¹, LI Yanchu¹, XU Dewei¹, ZHENG Linghong¹, LIN Mingsen^{1,2}

(1 *Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China*; 2 *National Satellite Ocean Application Center, State Oceanic Administration, Beijing 100081, China*)

Abstract: The satellite altimeter provides an efficient way for real time monitoring global and regional oceanographic parameters. The TOPEX satellite altimeter has provided the synchronously observed data of the global sea surface wind speed and significant wave height (SWH), so far, these data have the longest time series and the best data quality. The data of the SWH and the wind speed over the surrounding waters of Taiwan Island are compared with the data from the TOPEX satellite altimeter, and the validity is analyzed from the TOPEX satellite altimeter data. Meanwhile, the characteristics of the SWH which is greater than or equal to 4 m over the surrounding waters of Taiwan Island is analyzed. It is shown that the large waves commonly appear in winter and autumn every year, and the maximum of the mean SWH often appears in summer, but it is opposite in spring. When the SWH is greater than or equal to 6 m, it appears in the surrounding waters of the east or northeast of Taiwan Island, and it less appears in the surrounding waters of the south of Taiwan Island.

Key words: surrounding waters of Taiwan Island; significant wave height; very rough sea; characteristics of time space distribution